

Таким образом, полученные методом планирования эксперимента зависимости теплопроводности от плотности и температуры материала, показывают примерно равное влияние этих факторов на выход эксперимента.

Список литературы:

1. Основные направления развития производства эффективных теплоизоляционных материалов. [Информационный ресурс]: <http://msd.com.ua/stroitelnie-statii-1996/osnovnye-napravleniya-razvitiya-proizvodstva-effektivnykh-teploizolyacionnykh-materialov>
2. А.с.19875 Республика Казахстан. МКИ G01N25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности волокнистого материала / Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Никифоров А.С., Никонов Г.Н. Заявл. 08.02.07; Опубл. 15.08.08. Бюл. № 8.- 3 с

УДК 537.868.3

ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СЛАНЦЕВОГО ПЛАСТА

Князева А. Г.^{1,2}, д.ф.-м.н., Мартемьянов С. М.², Маслов А.Л.^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

² Томский политехнический университет

E-mail: masloaleksey@rambler.ru

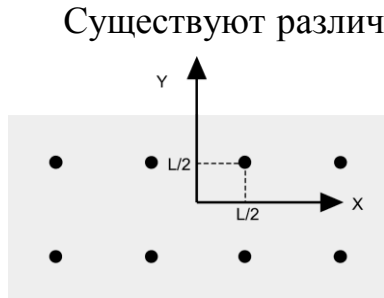


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи.

Существуют различные методы термической переработки горючих сланцев с целью получения энергетического сырья – т.н. сланцевого газа, однако особый интерес представляют способы, не требующие извлечения породы на поверхность [1]. В этих методах сланцевый газ добывается непосредственно из пласта по мере его нагрева тем или иным образом. Целью данной работы является построение модели термического разложения сланцевых пластов при их нагреве электромагнитным полем. Модель учитывает явления теплопроводности, межфазного тепло- и массообмена, тепловой эффект химических реакций и течение газа в порах. Вследствие существенной анизотропии свойств, сланцевый пласт представим в виде твердой пористой плоскости, в которой равномерно распределены источники тепла, представляющие из себя электроды, расстояние между которыми L принимается много большим их радиусов R_0 .

Геометрия расчетной области показана на рис.1. Очевидно, что для решения задачи достаточно найти распределение температуры только в

конечной области, включающей один источник с координатами $(L/2, L/2)$. Под действием переменного электрического поля в сланце выделяется тепло, связанное с его поляризацией, и джоулево тепло, вызванное током проводимости.

При нагреве твердофазный реагент A_s , образующий каркас сланца, разлагается на твердый продукт B_s и газ B_g , поступающий в поры. В начальный момент времени некоторое количество газа G_R , идентичного по составу B_g , уже содержится в порах. В свою очередь, газ G_R при нагреве превращается в газ G_p . Таким образом, химические реакции при разложении сланца можно представить следующей условной схемой:



По мере разложения меняется преобладающий механизм нагрева: вначале эффект связан преимущественно с диэлектрическими потерями, затем, по мере образования продукта B_s , преобладает джоулев нагрев.

Калориметрические измерения термического разложения сланцев [2] показали, что суммарный тепловой эффект реакции разложения сланца положителен, при этом на начальной стадии разложения керогена имеют место эндотермические эффекты. При дальнейшем повышении температуры начинается экзотермическая стадия, совпадающая с вторичной газификацией. Положим, что тепловой эффект реакции разложения твердой фазы отрицателен, а газообразный продукт реагирует с выделением тепла, причем экзотермический тепловой эффект преобладает.

Уравнение теплопроводности для твердой фазы имеет вид

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla \cdot (\nabla T_s) + Q_1 W_1 + \Phi_s - \frac{\alpha_T}{1-\zeta} (T_s - T_g),$$

где T_s, c_s, ρ_s – соответственно температура, теплоёмкость и плотность твердой фазы, t – время, x, y – пространственные координаты; λ_s – коэффициент теплопроводности твердой фазы, W_1 – химический источник (сток) тепла, Φ_s – источник тепла, связанный с действием электромагнитного поля на твердую фазу (зависит от расположения электродов, их радиусов, характеристик электрического поля) [3], α_T – коэффициент теплообмена между газом и твердой фазой, ζ – пористость, T_g – температура газа.

Тепловое действие переменного электромагнитного поля состоит из резистивных и диэлектрических потерь:

$$\Phi_s = \eta_{B_s} \sigma_1 E^2 + (1 - \eta_{B_s}) \varepsilon_1 \varepsilon_0 \Gamma E^2 \operatorname{tg} \delta_1,$$

где $E^2 = E_x^2 + E_y^2$ - квадрат напряжённости электрического поля, $E = E(x, y)$, σ_1 - проводимость, f - частота, ε_1 - диэлектрическая проницаемость твердой породы, ε_0 - диэлектрическая постоянная, $\operatorname{tg} \delta_1$ - тангенс угла (коэффициент) диэлектрических потерь.

Доли продуктов реакции в твердой фазе подчиняются уравнениям

$$\frac{d\eta_{B_s}}{dt} = k_1 (1 - \eta_{B_G} - \eta_{B_s}) \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right) \nu_s,$$

$$\frac{d\eta_{B_G}}{dt} = k_1 (1 - \eta_{B_G} - \eta_{B_s}) \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right) \nu_g - \frac{\alpha_m}{1 - \zeta} (\eta_{B_G} - \eta_G),$$

где k_1 - предэкспонент, E_1 - энергия активации реакции в твердой фазе, R - газовая постоянная, ν_s , ν_g - стехиометрические коэффициенты для реакции в твердой фазе.

Уравнение переноса тепла в газовой фазе имеет вид

$$c_g \rho_g \frac{dT_g}{dt} = Q_2 W_2 + \Phi_g + \frac{\alpha_T}{\zeta} (T_s - T_g),$$

где c_g, ρ_g - теплоёмкость и плотность газа; $\Phi_g = \eta_G \sigma_2 E^2 + (1 - \eta_G) \varepsilon_2 \varepsilon_0 \Gamma E^2 \operatorname{tg} \delta_2$ - источник тепла, связанный с действием электромагнитного поля на газ, σ_2 - проводимость, ε_2 - диэлектрическая проницаемость газа, $\operatorname{tg} \delta_2$ - тангенс угла (коэффициент) диэлектрических потерь, $\frac{d\ldots}{dt} = \frac{\partial \ldots}{\partial t} + v_x \frac{\partial \ldots}{\partial x} + v_y \frac{\partial \ldots}{\partial y}$, v_x , v_y - компоненты вектора скорости газа \mathbf{v}_g .

Суммарная реакция в газовой фазе - экзотермическая и соответствует схеме $G_R \rightarrow G_p$. Доля газообразного реагента меняется по закону

$$\frac{d\eta_G}{dt} = -k_2 \eta_G \exp\left(-\frac{E_2}{RT_g}\right) \nu_G + \frac{\alpha_m}{\zeta} (\eta_{B_G} - \eta_G),$$

где k_2 - предэкспонент, E_2 - энергия активации реакции в газовой фазе, ν_G - стехиометрический коэффициент, $\frac{d\ldots}{dt} = \frac{\partial \ldots}{\partial t} + v_x \frac{\partial \ldots}{\partial x} + v_y \frac{\partial \ldots}{\partial y}$.

Уравнение состояния для газа, который нельзя считать идеальным, в первом приближении запишем в виде: $dp_g = K_T (\alpha_T dT_g + \alpha_G d\eta_g)$,

где p_g - давление газа, K_T - объемный изотермический упругий модуль, α_T - коэффициент теплового расширения, α_G - коэффициент концентрационного расширения.

Скорость газа рассчитывалась из закона Дарси: $\mathbf{v}_g = -K_f \nabla p_g$, где $K_f = \frac{K}{\eta}$, K - коэффициент фильтрации, η - динамическая вязкость, откуда $\mathbf{v}_g = -K_f K_T (\alpha_T \nabla T + \alpha_G \nabla \eta_G)$.

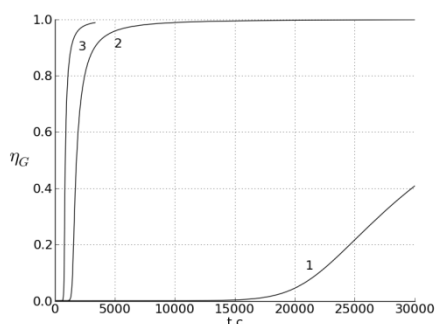


Рис. 2. Динамика доли газообразного продукта при варьировании потенциала (значения взяты в окрестности электрода).
1 - $\phi = 20000$ В., 2 - $\phi = 30000$ В.,
3 - $\phi = 35000$ В. $\zeta = 0.25$, $f = 10$ кГц.

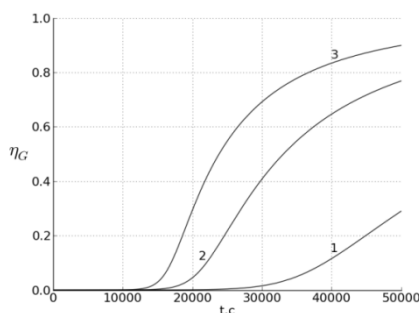


Рис. 3. Динамика доли газообразного продукта при варьировании пористости (значения взяты в окрестности электрода). 1 - $\zeta = 0.1$, 2 - $\zeta = 0.25$, 3 - $\zeta = 0.4$.
 $\phi = 20000$ В., $f = 10$ кГц.

Задача решена численно с использованием неявной схемы расщепления по координатам и покоординатной прогонки. Пример расчета накопления газообразного продукта показан на рис. 2-3:

Список литературы:

1. James G. Speight. Shale Oil Production Processes. Elsevier, - 2012.
2. William I. Stuart and John H. Levy. Thermal properties of carbonaceous oil shales from the Nagoorin and Condor deposits. Fuel, 1987, 66, pp. 493-498.
3. Князева, А.Г., Лопатин, В.В., Мартемьянов, С.М., Маслов, А.Л., Хан Вэй. Моделирование подземного нагрева сланцев в электромагнитном поле // Известия высших учебных заведений. Физика, 2011 – Том 54, - №11/3. – с. 5-11.